

LA GEOLOGÍA ES NOTICIA

**CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE UN
TERREMOTO PEQUEÑO PERO CATASTRÓFICO**

LORCA: EL TERREMOTO DEL 11 DE MAYO DE 2011

José J. Martínez Díaz

(pag. 362)



11 DE MARZO DE 2011: EL BIG ONE EN UN LUGAR NO ESPERADO

EL TERREMOTO, Mw=9,0, DE TOHOKU-OKI (JAPÓN)

José Morales

(pag. 365)



EL TERREMOTO DE HAITÍ

**Dos años después continúa la incertidumbre
sobre la falla sísmica que ocasionó el desastre**

José Luis Granja Bruña - Andrés Carbó Gorosabel

Pedro Pablo Hernaiz-Huerta - Pilar Llanes Estrada

Alfonso Muñoz-Martín - Antonio Olaiz Campos



(pag. 369)



(pag. 372)

*José A. Álvarez
Gómez*



(pag. 375)

LA BASE DE DATOS DE FALLAS ACTIVAS CUATERNARIAS DE IBERIA (QAFI)

Julián García-Mayordomo

**TERREMOTOS TSUNAMIGÉNICOS:
REFLEXIONES DE LOS
TSUNAMIS DE CHILE
(2010) Y JAPÓN (2011)**

Terremotos Tsunamigénicos:

REFLEXIONES DE LOS TSUNAMIS DE CHILE (2010) Y JAPÓN (2011)

JOSÉ A. ÁLVAREZ GÓMEZ

Instituto de Hidráulica Ambiental – IH Cantabria – Universidad de Cantabria

Dep. Geodinámica – Facultad de Geología – Universidad Complutense de Madrid

La Naturaleza nos ha vuelto a recordar el gran poder de destrucción de los tsunamis. En lo que va de siglo, se han producido tres con consecuencias catastróficas, el del Océano Índico en 2004 (ver el monográfico “Tsunami”, número 13.1 de Enseñanza de las Ciencias de la Tierra), el de Concepción en Chile en 2010 y el de Tōhoku en Japón de 2011. Quizás puedan parecer demasiado segui-

dos y demasiado desastrosos, pero con sólo hacer un poco de memoria comprobamos que los tsunamis son fenómenos naturales bastante frecuentes. De 1952 a 1964 se produjeron tres grandes terremotos, dos de ellos de los mayores que se han registrado en la historia, con sus consiguientes grandes tsunamis. En 1952 un terremoto de magnitud 8.5 arrasó la ciudad de Severo-Kurilsk, en las islas Kuriles, de la antigua URSS, matando a unas 2400 personas de una población estimada de 6000. En 1960 tuvo lugar el

famoso terremoto de Valdivia, en Chile, el mayor registrado hasta el momento, con una magnitud de 9.5, dejando 6000 fallecidos en todo el mundo (causó víctimas incluso en Hawai y Japón, a miles de kilómetros del epicentro). En 1964 en Alaska tuvo lugar un terremoto de magnitud 9.2 que generó un tsunami que causó algo más de un centenar de víctimas.

Si retrocedemos algo más en el tiempo vemos cómo en la primera mitad del s. XX ocurrieron media docena de tsunamis que dejaron víctimas. Entre estos

Fig.1. Fotografía tomada por la marina de los Estados Unidos de América en las operaciones de rescate y apoyo tras el tsunami de Tōhoku de 2011 en la población de Otsuchi, Iwate, Japón. Puede verse en primer plano el puerto de la población y la barrera anti-tsunami. Hacia el interior un barco ha sido arrastrado y dejado sobre un edificio que permanece en pie.



está el terremoto y tsunami de Messina, en la isla italiana de Sicilia, que destruyó la ciudad y dejó más de 70000 muertos. O el de Sanriku, en Japón, en 1933, con más de 3000 muertos, en una zona que más tarde se ha visto afectada por el tsunami de 2011. Podríamos ir aún más atrás y ver cómo en el s. XIX al menos media docena de terremotos generaron tsunamis destructivos (sin contar el tsunami generado por la explosión de la isla volcánica de Krakatoa), y otros tantos tuvieron lugar en el s. XVIII, entre ellos el desastroso y conocido tsunami de Lisboa de 1755, que se generó unos cientos de kilómetros al suroeste del Cabo de San Vicente y que afectó a la costa suroccidental de la Península Ibérica y la noroccidental de África, dejando decenas de miles de muertos entre Portugal y España.

De todos los eventos producidos a lo largo de la historia, aproximadamente la mitad lo son en Japón. Los japoneses han registrado minuciosamente la ocurrencia de estos eventos incluyéndolos en su cultura como provocados por una deidad llamada "Namazu", en forma de siluro gigante, que agitando su cola hace que la tierra tiemble y el mar se agite. Desde la antigüedad Japón ha estado a la cabeza del estudio de estos fenómenos de la naturaleza, y actualmente es probablemente el país del mundo con un conocimiento más profundo de estos; además es el país más avanzado en cuanto a medidas de mitigación y alerta ante este tipo de amenazas. Sin embargo esto no ha impedido que el reciente tsunami de Tōhoku se haya convertido en el mayor desastre para Japón desde la finalización de la segunda guerra mundial.

Un año antes, al otro lado del Pacífico, un terremoto de magnitud Mw 8.8 desató un tsunami sobre la costa de Chile, en las regiones de Maule y Bio-Bio. A pesar de la magnitud del terremoto, y de los daños causados sobre las viviendas (se calcula que unas 370 000 edificaciones fueron afectadas) los mayores daños personales fueron debidos al tsunami. Del mismo modo que en Japón, en Chile la ocurrencia de terremotos de gran magnitud es relativamente frecuente y, por lo tanto, la generación de tsunamis. A lo largo de su historia reciente Chile ha sufrido un buen número de terremotos destructivos acompañados de tsunamis, y debido a las particulares características del límite de placas responsable de

estos eventos, se pueden estimar razonablemente las zonas con un mayor riesgo de sufrir un nuevo tsunami en el futuro. En los años anteriores al evento, diferentes artículos científicos habían destacado la alta probabilidad de ocurrencia de un nuevo evento destructivo en la zona de Maule y Bio-Bio.

Tanto en Japón como en Chile la ocurrencia de este tipo de eventos no es una sorpresa, y de hecho son dos de los países más estudiados por los científicos de todo el mundo para adquirir un mayor conocimiento de los procesos generadores de estos mega-terremotos y mega-tsunamis. Sin embargo, si la ocurrencia de estos fenómenos naturales no es una sorpresa ¿por qué siguen cobrándose tantas vidas?

Incertidumbre científica

A pesar de la relativa frecuencia de estos grandes eventos en Chile y Japón, estadísticamente la cantidad de casos de estudio en época reciente es escasa. Para poder hacer predicciones o estimaciones realistas sobre un proceso físico es necesario conocer en detalle cuál es el funcionamiento del objeto de estudio. En el caso de los tsunamis, el proceso de propagación de ondas de gran longitud a través del mar, se puede modelar numéricamente con gran aproximación a la realidad desde el punto de vista matemático. Se utilizan las llamadas ecuaciones de aguas someras (ya que la longitud de onda, de decenas de kilómetros, es mayor que la profundidad del medio en el que se propaga, hasta un máximo de 10 km pero de media en torno a los 5 km) incluyendo lo que se conoce como componentes no lineales de las ecuaciones, vitales para el correcto modelado en aguas poco profundas. Sin embargo lo determinante para obtener buenos resultados en este tipo de modelos es, por un lado, la correcta representación del medio físico en el que las olas se propagan y, por otro, la fuente generadora de estas olas. Estos dos aspectos clave en el modelado numérico de tsunamis presentan grandes dificultades y conllevan importantes incertidumbres.

El medio es el agua marina, cuyas características físicas para la propagación de las ondas son bien conocidas, pero la morfología de la batimetría, es decir, del fondo marino no está tan bien caracterizada. Cuando la ola se propaga en grandes profundidades, en alta mar, las irregularidades del fondo oceánico apenas afectan

a la onda que se está propagando. Sin embargo, cuanto más nos acercamos a la costa y menor es la profundidad, mayor es la influencia de la batimetría en los resultados debido a la no linealidad de las ecuaciones matemáticas. Es algo así como el famoso efecto mariposa de la teoría del caos aplicado a los modelos atmosféricos pero en esta ocasión aplicado a los modelos de oleaje marino. Esto quiere decir que las pequeñas variaciones en el fondo marino determinan en gran medida las características de las olas del tsunami en la costa. Los procesos litorales y la dinámica costera van modificando de manera continua la morfología de este fondo marino, de manera que es prácticamente imposible contar con modelos digitales de la batimetría con la precisión suficiente como para hacer estimaciones realistas de los efectos de las olas de tsunami sobre la costa.

A esta incertidumbre de la morfología del fondo marino se añade otra mayor, que es la de la fuente que va a generar el tsunami, es decir, las características del terremoto o el deslizamiento submarino. Estos modelos numéricos se han de hacer con anticipación a la ocurrencia del evento debido a que las capacidades de cálculo de los ordenadores actuales no permiten hacer este tipo de modelos en tiempo real. Es decir, cuando sucede el evento tenemos que disponer de antemano de una serie de modelos numéricos que se aproximen lo más posible al que ha sucedido. Mediante estos modelos predefinidos las instituciones responsables de la alerta de tsunami han de hacer sus planificaciones ante emergencias, sus predicciones de las áreas que pueden verse más afectadas y han de estimar las características de las olas que pueden llegar. Así, para tener una serie de modelos predefinidos hemos de predecir cuáles son las características más probables del evento generador del tsunami, en los casos que nos ocupan, los terremotos. Si no tenemos un conocimiento suficiente de la geología de una zona o del proceso de generación de estos mega-terremotos, difícilmente podremos hacer estimaciones correctas de la fuente que puede dar lugar al tsunami.

En Chile se tenía una estimación bastante aproximada de las características que un gran terremoto podría tener en esa zona, y existía un sistema de alerta de tsunami razonable. Sin embargo se care-

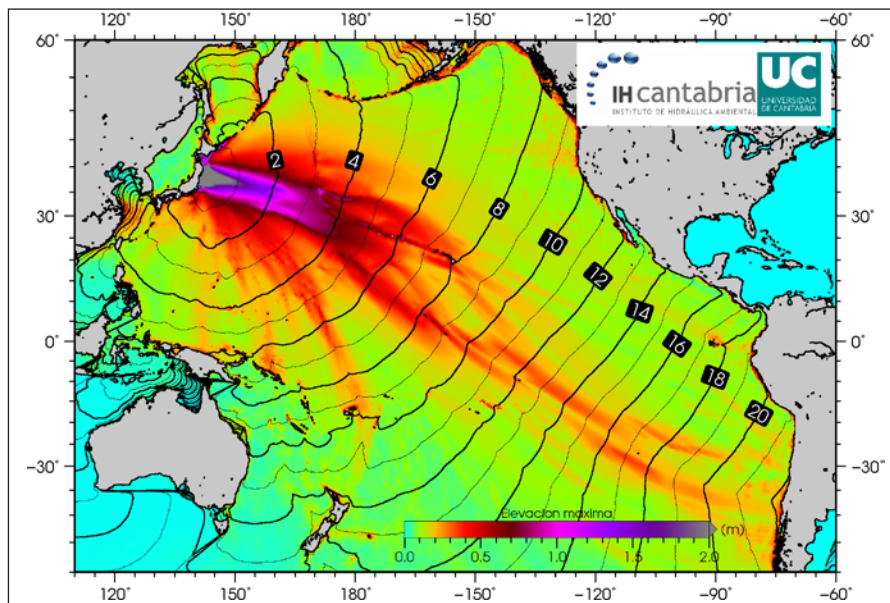


Fig. 2. Mapa de elevaciones de ola y tiempo de viaje (en horas) del tsunami de Japón de 2011. El mapa fue realizado en las primeras horas tras el terremoto por el Instituto de hidráulica ambiental "IH Cantabria" en base a modelos numéricos de propagación de oleaje realizados con las primeras estimaciones de fuente sísmica.

cía de modelos numéricos actuales con la previsión de zonas que podrían verse potencialmente afectadas. En Japón por el contrario si se tenían modelos de tsunami con los que determinar las zonas que podrían verse más afectadas y la magnitud aproximada de la ola. Sin embargo estos modelos no contemplaban la ocurrencia de un evento con una magnitud tan grande como el que tuvo lugar, de manera que subestimaban la peligrosidad del tsunami en la zona afectada. Ambos eventos son buenos ejemplos de las limitaciones que impone la incertidumbre científica para la predicción y prevención de procesos geológicos de tan baja frecuencia.

Factor humano

No sólo la incertidumbre científica explica el porqué de estas catástrofes. En ambos casos se contaba con sistemas de alerta eficientes que de haber funcionado a la perfección habrían salvado más vidas. Y es que, en todo sistema de alerta, en toda situación de emergencia el factor humano es determinante.

En Chile, en 2005, tras la ocurrencia de un terremoto lejano de magnitud Mw 6.6 (improbable generador de un tsunami) la institución encargada de la alerta de tsunami, quizás muy influida por el aún reciente tsunami de Indonesia, informó de la posible ocurrencia de un tsunami y decidieron evacuar a la población de la costa. El tsunami no tuvo lugar, pero en las horas en las que la población fue

evacuada se produjeron saqueos en las ciudades, lo que provocó una situación bochornosa para las autoridades. Cuando en 2010 tuvo lugar el evento de Mw 8.8, sabiendo las características iniciales del terremoto, todos los científicos que estamos implicados en la investigación de los tsunamis teníamos claro que se iba a producir un tsunami considerable en la costa chilena. Al igual que nosotros, los científicos chilenos lo sabían. El centro de alerta para el pacífico, el PTWC (Pacific Tsunami Warning Center), emitió alerta para Chile y Perú dando estimaciones de hora de llegada de la ola. Sin embargo, ¿quién se arriesgaba a decidir la evacuación de la población tras la reciente experiencia de la falsa alarma de 2005? En esos momentos de incertidumbre, de miedo a la responsabilidad, se decidió no alertar de la posible ocurrencia del tsunami y se calmó a la población diciendo que no había riesgo de tsunami. Esto se dijo en la televisión nacional por representantes del gobierno mientras las olas dejaban víctimas en la costa frente a la que se generó el tsunami.

En Japón, los tsunamis están integrados en su cultura y tienen probablemente el mejor sistema de alerta del mundo. Tienen incluso infraestructuras de protección frente a los tsunamis. Cuando ocurrió el terremoto de magnitud Mw 9.0, los sistemas de alerta entraron en funcionamiento, la población esperaba la ocurrencia del tsunami y las institucio-

nes alertaban de olas superiores a 3 metros de altura según predecían los sofisticados sistemas de alerta japoneses. Esta ola de algo más de tres metros no sería capaz de superar las barreras anti-tsunami construidas en diferentes lugares de la costa. La evacuación masiva y rápida, que habría sido necesaria en algunos lugares, no tuvo lugar por exceso de confianza. Cuando una ola mucho mayor de lo previsto llegó a la costa no hubo tiempo para huir. En algunas zonas no pudieron ponerse a salvo, y en las zonas con barreras la población, que confiaba en su efectividad, presenció cómo la ola superaba su altura de diseño. A este desastre hubo que añadir la falta de previsión a la hora de construir las centrales nucleares de Fukushima. Construir una central nuclear en la costa, al nivel del mar, en un país como Japón, es una imprudencia evidente.

Consideración final

Cada vez los modelos numéricos que utilizamos para hacer predicciones de daños por tsunami son mejores; se ha logrado reproducir el fenómeno de la propagación de grandes olas de una manera bastante fiable. Sin embargo aún quedan escollos por superar, como la obtención de batimetrías con un nivel de detalle y precisión suficiente, pero sobre todo lograr la caracterización adecuada de las fuentes que generan estos tsunamis. Las limitaciones en el estudio de estos fenómenos son grandes. Es un sistema de difícil observación y la frecuencia de este tipo de eventos es muy baja. Con cada gran terremoto la comunidad científica aprende y muchos suponen un acicate que en ocasiones revoluciona el estudio del fenómeno. Esto pasó con el famoso terremoto de San Francisco, de 1906, y ha pasado también con el gran tsunami del Índico de 2004. Los recientes tsunamis de Chile y Japón nos han dado lecciones a los científicos, pero sobre todo han puesto de relieve la importancia de una correcta toma de decisiones y de las medidas de autoprotección frente a los desastres naturales. Como dijo Imamura, especialista en tsunamis de la Universidad de Tōhoku tras el tsunami de Japón de 2011: "Lo que nosotros hacemos es ciencias naturales. Pero cómo la gente lee estos números es un problema difícil que requiere ciencias humanas. Necesitamos más investigación a este respecto." ●